



***Caracterização da Madeira como Elemento Filtrante para o  
Tratamento de Água***

Bruno Gimenez Zanduzzo

Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz Sens

2013/2





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

**CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA COMO ELEMENTO  
FILTRANTE PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

**BRUNO GIMENEZ ZANDUZZO**

Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz  
Sens

Florianópolis, SC  
2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA COMO ELEMENTO  
FILTRANTE PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA

BRUNO GIMENEZ ZANDUZZO

Trabalho submetido à Banca Examinadora  
como parte dos requisitos para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA :

---

Prof. Dr. Maurício Luiz Sens  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Fernando Soares Pinto SantAnna  
(Membro da Banca)

---

Dra. Renata Iza Mondardo  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, SC  
DEZEMBRO/2013



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente e especialmente aos meus pais, Janete e Donizetti, pelo amor incondicional, por estarem sempre ao meu lado e pelos ensinamentos que fizeram ser quem sou.

Aos meus irmãos, Marcelo e Arthur, por serem meus companheiros de toda a vida.

Aos meus familiares, avós, tios, primos, que eu tanto gosto de visitar.

Aos amigos de infância, que apesar da distância, estiveram e estarão sempre em meus pensamentos.

Aos colegas de graduação, que compartilharam ótimos momentos durante esses anos.

Sou grato a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.





## RESUMO

Com a crescente conscientização da necessidade de otimizar o uso dos recursos hídricos, a pesquisa de tecnologias alternativas de tratamento de água se faz necessária para atender a demandas específicas de consumo, com sistemas acessíveis e viáveis a população. Neste trabalho se estudou as características relevantes das madeiras pinus, caixeta e garapuvu, como elemento filtrante para o tratamento de águas. O trabalho foi embasado em pesquisas bibliográficas que apontam as semelhanças entre membranas de tratamento de água e as características naturais das madeiras que favorecem a filtração. Para uma análise da estrutura das madeiras e seus poros, amostras das três espécies, pertencentes aos dois grandes grupos de plantas na natureza, angiospermas e gimnospermas, foram observadas por microscopia eletrônica. O desempenho das madeiras como elemento filtrante foi avaliado a partir de um ensaio em um sistema piloto de filtração frontal, onde partes seccionadas do tronco das três madeiras foram submetidas à filtração de água. Partindo de uma água coagulada e de um tratamento prévio das amostras, foi possível avaliar características como as diferenças entre os sentidos de escoamento de água na filtração, a eficiência na redução dos parâmetros de qualidade da água, as pressões de trabalho e a vazão. Ainda, a pesquisa avaliou o desempenho de um tratamento prévio por autoclavagem das madeiras, com o objetivo de limpar os seus poros. A caracterização das madeiras por microscopia eletrônica foi feita no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), e os ensaios de filtração foram realizados no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), ambos pertencentes a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os resultados possibilitaram uma comparação entre as madeiras estudadas sob o aspecto de determinar a madeira mais apta à filtração, de acordo com a finalidade do tratamento. A garapuvu se mostrou ineficiente na redução de contaminantes, enquanto o pinus e a caixeta deixaram a água filtrada dentro dos padrões de consumo humano. Foi estabelecido a faixa de filtração dos poros das madeiras, que estão pouco acima da microfiltração. O sentido de filtração perpendicular as fibras na madeira pinus se mostrou eficiente na remoção de contaminantes, porém, foi requerida uma alta pressão de trabalho.

**Palavras-chave:** Tratamento de água, membranas, filtração em madeira.



## ABSTRACT

With the increasing awareness of the need for water resources optimization, the research of alternative technologies for water treatment is necessary to meet specific demands of consumption, through affordable and viable systems for the population. This paper studied the relevant characteristics of the woods: pine, caixeta and garapuvu, as filter media for water treatment. The work was based on literature searches, which point the similarities between membrane water treatment and the natural characteristics of woods that favor water filtration. In order to analyse the structure of wood and its pores, samples of the three species belonging to two major groups of plants in nature, angiosperms and gymnosperms, were observed by electron microscopy, which were analyzed the layout, the quantity and the size of its pores. The performance of the three samples of woods as a filter element was evaluated from a test on a front pilot filtration system. Starting from a coagulated water and a pre-treatment of wood samples, it was possible to assess characteristics such as differences between the directions of water flow in filtration, efficiency in reducing water quality parameters, work pressures and flow. Furthermore, the study evaluated the performance of a pretreatment by autoclaving the timbers, aimed at cleansing its pores. The characterization of the woods by electron microscopy was performed at the Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), and the filtration tests were performed at the Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), both from the Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). The results allowed a comparison between the timbers studied from the standpoint of determining the most suitable timber for filtering in accordance with the purpose of the treatment. The garapuvu was inefficient in reducing water quality parameters, while pine and caixeta left the filtered water within the standards for human consumption. It was established band filter pores of the studied woods, which are slightly above microfiltration. The perpendicular direction to the pinewood fibers proved effective in reducing the parameters of water quality, but was required a high pressure of operation.

**Keywords:** water treatment, membranes, filtration timber.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: As três gerações de membranas filtrantes orgânicas: membrana simétrica (Deshmkh & Leslie, 1999); (b) membrana assimétrica (Aptel & Buckley, 1996); (c) membrana composta (Bradley, 1993).Fonte: SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.....	27
Figura 2: Filtração frontal e tangencial.Fonte: LYONNAISE DES EAUX, 1999, <i>apud</i> SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.....	28
Figura 3: Lenho típico de uma conífera (esquerda) e de uma angiosperma (direita).....	33
Figura 4: Diferenciação entre o cerne e albúmeno em uma porção de caule. ....	34
Figura 5: Planos de corte típicos de madeiras. ....	35
Figura 6: Relação entre espessura da parede e eficiência na filtração tangencial da madeira pinus. ....	39
Figura 7: Tora das madeiras pinus, garapuvu e caixeta.....	41
Figura 8: Aparelho de microscopia eletrônica JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope.....	42
Figura 9: Amostras das madeiras após corte e cobrimento de ouro. ....	43
Figura 10 e Figura 11: Delimitação das áreas para a determinação do diâmetro dos poros grandes e pequenos. ....	45
Figuras 12 e 13: Desenho tridimensional do piloto de filtração frontal.	46
Figuras 14 e 15: Cilindro de ar pressurizado ligado ao piloto de filtração. ....	47
Figura 16: Corte com a ferramenta serra-copo das amostras de madeira. ....	48
Figura 17: Amostras para ensaio de filtração frontal. ....	49
Figura 18: Ensaio de Jar-Test para preparação de água coagulada. ....	51
Figura 19: Madeira caixeta em aproximação 22x. ....	67
Figura 20: Madeira caixeta em aproximação 250x. ....	67
Figura 21: Madeira caixeta em aproximação 50x. ....	67
Figura 22: Madeira caixeta em aproximação 500x. ....	67
Figura 23: Madeira garapuvu em aproximação 22x.....	67
Figura 24: Madeira garapuvu em aproximação 50x.....	67

Figura 25: Madeira garapuvu em aproximação 50x.....	68
Figura 26: Madeira pinus em aproximação 22x.....	68
Figura 27: Madeira pinus em aproximação 250x.....	68
Figura 28: Madeira garapuvu em aproximação 500x.....	68
Figura 29: Madeira pinus em aproximação 50x. ....	68
Figura 30: Madeira pinus em aproximação 500x.....	68
Figura 31: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 22x. ....	69
Figura 32: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 250x. ....	69
Figura 33: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 50x.....	69
Figura 34: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 1.000x. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência e pressão de operação de membranas utilizadas no saneamento básico. Fonte: SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.....	32
Tabela 2: Padrões de qualidade da água bruta para o ensaio de filtração frontal. ....	50
Tabela 3: Características das amostras das madeiras analisadas. ....	52
Tabela 4: Resultado da análise dos poros das madeiras. ....	53
Tabela 5: Resultado da filtração de água coagulada nas diferentes amostras de madeira e as condições da água pré-filtração. ....	54
Tabela 6: Limites estabelecidos pela Portaria N° 2.914 do Ministério da Saúde dos padrões de qualidade para a água de consumo humano. ....	54
Tabela 7: Resultado das pressões de trabalho, tempo de filtração e resistência da membrana. ....	58
Tabela 8: Resultado da filtração de uma água tratada pela rede pública ao ser filtrada pelos filtros de madeira. ....	60



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Remoção de turbidez e cor aparente e o diâmetro dos poros pequenos das amostras de madeira. ....	55
Gráfico 2: Análise de absorbância. ....	56
Gráfico 3: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a vazão no ensaio de filtração. ....	57
Gráfico 4: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a pressão de trabalho no ensaio de filtração. ....	58
Gráfico 5: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a resistência das membranas no ensaio de filtração. ....	59





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Qualidade da Água para o Consumo Humano	22
2.2	Tratamento de Água	24
2.3	Filtração de Água por Membranas	25
2.3.1	Características das Membranas	28
2.4	Madeiras	32
2.4.1	Espécies de Árvores Estudadas	37
2.4.2	Filtração em Madeiras	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	Escolha das Madeiras	40
3.2	Caracterização por Microscopia Eletrônica	41
3.2.1	Preparação das Amostras	42
3.2.2	Análise de Microscopia Eletrônica	43
3.2.3	Determinação da Porosidade e Diâmetro dos Poros	44
3.3	Ensaio em Sistema de Filtração Frontal	45
3.3.1	Preparação das Amostras das Madeiras Utilizadas no Sistema Piloto de Filtração Frontal	47
3.3.2	Preparação da Água Bruta e Análises de Qualidade	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5	CONCLUSÕES	61
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
7	ANEXOS	66



# 1 INTRODUÇÃO

A água, como um recurso natural indispensável à vida, já não se encontra disponível a todos e em qualquer lugar. Em comunidades isoladas, longe do abastecimento da rede pública, deve-se pensar em alternativas viáveis para o tratamento da água em menor escala. Nos municípios, a venda de água engarrafada cresce com a preocupação sobre a qualidade do suprimento de água municipal.

DI BERNARDO e DANTAS (2005) destacam as condições desejáveis na escolha de uma tecnologia apropriada ao tratamento de uma água, tais como: as condições sócio-econômicas da comunidade e posição geográfica; capacidade da estação de tratamento; disponibilidade de recursos financeiros; existência de pessoal qualificado para construção, operação e manutenção; disponibilidade de materiais de construção e de produtos químicos.

O desenvolvimento de um novo material; para a filtração de água utilizando-se da disposição natural dos poros no interior dos tecidos lenhosos das madeiras pode significar uma alternativa para a filtração de água por membranas sintéticas. SCHNEIDER e TSUTIYA (2001) apontam os altos custos de fabricação e de limpeza das membranas sintéticas como entraves na aplicação desta tecnologia em maiores escalas, ou em sistemas isolados, como por exemplo, para filtros domésticos. Neste contexto, o estudo da utilização da madeira como elemento filtrante pode representar uma forma eficiente, fácil de operar e de baixo custo para o tratamento de água, já que a madeira é um material renovável, moldável e encontrado em abundância no meio ambiente. Com isso, este trabalho de conclusão de curso da graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental, pretende analisar a viabilidade da madeira como elemento filtrante, as condições ideais de escoamento de água em seus poros, a preparação ideal da madeira, e os possíveis fins que podem se destinar essa tecnologia.

A pesquisa deste trabalho tem como base o conhecimento aplicado em filtração por membranas, assim como técnicas de tratamento de água. Será estudado o processo de filtração por membranas, a fim de realizar uma analogia entre as técnicas hoje difundidas e o desenvolvimento desta nova tecnologia.

Este trabalho se utilizará das experiências aprendidas no trabalho de CORRÊA (2002), que deu início ao estudo de tratamento de água por fibras naturais de madeira. Nele foram descritas algumas

propriedades da madeira, sua capacidade de renovar-se, como se comportou como elemento filtrante, e, analisou, ainda, entre as madeiras estudadas, qual foi a espécie mais favorável para a finalidade de filtração de água.

O trabalho compreenderá um estudo de três diferentes madeiras de árvores que fazem parte da vegetação brasileira, e as suas propriedades estruturais que favorecem a filtração de água. As árvores escolhidas (pinus, caixeta e garapuvu) estão compreendidas em dois grandes grupos na natureza, as angiospermas e gimnospermas. Estes grupos possuem estruturas distintas na formação de seus tecidos, interferindo na disposição dos vasos internos (poros) de distribuição da seiva e na densidade da madeira.

O conhecimento da disposição dos poros das três espécies de madeira é importante pra se chegar a conclusões sobre o melhor sentido de escoamento da água a ser filtrada no interior do tecido lenhoso. Sabe-se que os tecidos lenhosos, possuem células alongadas, responsáveis pela condução de água e nutrientes, tanto no sentido paralelo ao crescimento da árvore, quanto no sentido perpendicular. Para isso, se utilizará da microscopia eletrônica, que é capaz de visualizar uma projeção aproximada das estruturas das madeiras.

O estudo da quantidade de poros dos tecidos lenhosos é determinante para analisar a madeira menos densa e conseqüentemente mais apta ao escoamento de água. Através do software ImageJ é possível obter as medidas dos poros nas imagens selecionadas na microscopia eletrônica, determinar a faixa de filtração que se situam os poros das madeiras e chegar a um comparativo entre elas.

Com base nestes conhecimentos, foi projetado um sistema piloto de filtração para avaliar as três espécies de madeira em relação a qualidade da água filtrada, a vazão de água permeada através das madeiras e a pressão de trabalho requerida. Para a madeira pinus, foi possível estabelecer um comparativo entre o sentido de filtração paralelo ao crescimento da árvore e ao sentido perpendicular. Também, chegou-se a conclusões sobre as condições prévias da água a ser filtrada e a preparação das amostras de madeiras.

Por fim, a proposta deste trabalho de conclusão de curso pretende aprofundar a pesquisa científica na área de tratamento de água, trazendo argumentações técnicas para justificar o desenvolvimento de um novo material que objetive um tratamento acessível e viável a população.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar as características das madeiras: caixeta - *Tabebuia cassinoides* (LAM.) DC. -, garapuvu - *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - e pinus - *Pinus elliottii* -, para servir como elemento filtrante no tratamento de água.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Definir a madeira mais apta a servir como elemento filtrante para a potabilização de água em relação a pressão de trabalho, a quantidade de água permeada, a porosidade e diâmetro dos poros, e, a qualidade da água filtrada.
- ✓ Determinar em que faixa de filtração (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração) está inserido os poros das madeiras escolhidas.
- ✓ Avaliar a filtração de água em relação aos poros presentes nos sentidos longitudinal e transversal ao tronco da madeira pinus.
- ✓ Avaliar o pré-tratamento das madeiras por autoclavagem, objetivando a limpeza dos poros.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Qualidade da Água para o Consumo Humano**

As características desejáveis de uma água dependem de sua utilização. As águas destinadas ao consumo humano e ao abastecimento industrial estão frequentemente associadas a um tratamento prévio, devido aos requisitos de qualidade exigidos. A água destinada ao consumo humano deve preencher condições mínimas para que possa ser ingerida ou utilizada para fins higiênicos, tais como estar isenta de microrganismos patogênicos e, com relação a substâncias orgânicas ou inorgânicas, os teores das mesmas não deverão ser prejudiciais ao ser humano, deve estar livre de matéria suspensa visível, cor, gosto e odor (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). VON SPERLING (2005) destaca a água de abastecimento doméstico como o uso mais nobre do recurso, e este requer a satisfação de critérios de qualidade.

Os componentes que compõem uma água, e que alteram seu grau de pureza, devem ser retratados em termos de suas características físicas, químicas e biológicas (VON SPERLING, 2005). De acordo com o autor, dentre as impurezas, os sólidos presentes na água são a parte mais significativa por todos os contaminantes contribuírem para a carga de sólidos em uma água. Estes são classificados de acordo com seu tamanho entre sólidos dissolvidos, coloidais e suspensos. Nessa classificação o tamanho das partículas de sólidos dissolvidos variam entre  $10^{-6}$  e  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$ , de  $10^{-3}$  a  $10^0$   $\mu\text{m}$  para partículas coloidais e, entre  $10^0$  a  $10^3$   $\mu\text{m}$  para sólidos suspensos. Também, podem ser classificados pelas suas características químicas entre sólidos orgânicos, aqueles que ao serem submetidos a temperaturas elevadas se volatizam, e sólidos inorgânicos. Esta classificação representa um comparativo entre a matéria orgânica e inorgânica, ou mineral, presente nas águas.

Os parâmetros de qualidade de água são as características físicas, químicas e biológicas que definem o controle a ser avaliado no uso de uma água. Estas características, segundo LIBÂNIO (2008), são consequência da capacidade de dissolução de uma ampla gama de substâncias e de transporte pelo escoamento superficial e subterrâneo da água.

Substâncias como areia, silte e argila resultam em alterações físicas na água, que alteram a sua turbidez, enquanto a decomposição da matéria orgânica provoca alterações na cor da água. A cor e a turbidez

estão entre os parâmetros de qualidade mais comumente utilizados no controle e operação de estações de tratamento de água, e na caracterização de águas de abastecimento. Segundo LIBÂNIO (2008) a cor é produzida pela reflexão da luz em sólidos dissolvidos na água, resultante além da decomposição da matéria orgânica, da presença de compostos de ferro e manganês. As atividades antrópicas como a descarga de efluentes domésticos ou industriais, lixiviação de vias urbanas e solos agricultáveis, são as principais fontes de coloração na água. É relevante a distinção entre cor verdadeira e aparente. Segundo VON SPERLLING (2005) no valor da cor aparente considera-se as partículas suspensas, incluindo assim uma parcela devido a turbidez da água, enquanto, a cor verdadeira é determinada pela centrifugação ou filtração da amostra em filtro de papel para remoção das partículas suspensas.

A turbidez é decorrente da presença de partículas suspensas presentes na massa líquida, e representa, segundo LIBÂNIO (2008), a interferência das partículas à passagem de um feixe de luz através da amostra. O mesmo autor aponta que a origem da turbidez em águas está associada a partículas de rocha, argila e silte presentes no solo, que apesar de não trazer inconvenientes sanitários diretos, é esteticamente desagradável na água potável. Ainda, a origem pode ser antropogênica, no caso de despejos domésticos ou industriais, na presença de microrganismos e erosão.

Outros parâmetros de qualidade abordados nesse trabalho são a condutividade elétrica e o pH. A condutividade, segundo LIBÂNIO (2008), indica a capacidade da água natural em transmitir a corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions. O autor ressalta que esse não é um parâmetro integrante do padrão de potabilidade brasileiro, porém, constitui-se em um importante indicador de eventual lançamento de efluentes já que relaciona-se à concentração de sólidos dissolvidos. O potencial hidrogeniônico (pH) representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do ambiente de uma água, sendo seu valor medido pela concentração de íons  $H^+$  na solução. Sua determinação é importante nas etapas de controle do tratamento de água, como na coagulação e desinfecção.

No Brasil os padrões de qualidade da água para o consumo humano são estabelecidos pelo Ministério da Saúde, sob a portaria nº 2.914 de dezembro de 2011. Esta portaria é complementar a resolução

nº 357 de 2005 do CONAMA, que faz menção à água em seu uso múltiplo.

## **2.2 Tratamento de Água**

É dever do serviço de abastecimento de água disponibilizar uma água compatível com o que regulamenta as normas de qualidade do local a ser atendido. As análises das águas nos mananciais revelarão a necessidade ou a dispensabilidade de um tratamento para essa água.

O tratamento de água consiste no conjunto de processos e operações físico-químicos que garantam a remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias possivelmente deletérias à saúde humana, porventura presentes nas águas naturais (LIBÂNIO 2008).

Segundo o mesmo autor, a escolha de uma tecnologia para o tratamento de água deve ser avaliada de acordo com as características da água bruta; os custos de implantação, manutenção e operação; manuseio e confiabilidade dos equipamentos; flexibilidade operacional; localização geográfica e características da comunidade; disposição final do lodo. Basicamente, as tecnologias de tratamento se baseiam em três fases: clarificação, filtração e desinfecção, havendo múltiplas configurações possíveis de sistemas para atender a tais propósitos.

DI BERNARDO e DANTAS (2005) destacam a filtração como a etapa mais comumente requerida dentre os sistemas utilizados, pois somente nela é que são removidos, quase que em sua totalidade, as partículas coloidais, suspensas e microrganismos em geral. O autor ainda aponta a importância da filtração como o principal responsável pela produção de uma água com qualidade, por ser um processo final de remoção de impurezas numa estação de tratamento de água.

A filtração pode ser rápida ou lenta, dependendo da taxa de filtração. DI BERNARDO, BRANDÃO e HELLER (1999), indicam valores de taxa de filtração comumente utilizados em filtros rápidos, variando entre 150 e 600 m/d, enquanto os filtros lentos operam com taxas inferiores a 6 m/d. Os dois processos distinguem-se também pela necessidade de coagulação química. A filtração rápida requer o tratamento da água bruta com coagulação química, e é chamada de filtração direta quando o tratamento não utiliza decantadores para a sedimentação de flocos. Na filtração lenta não é utilizada a coagulação química, e por isso a água a ser filtrada deve possuir características

apropriadas para se ter um tratamento eficaz. DI BERNARDO e DANTAS (1993) indicam a restrição da utilização de filtros lentos em águas que apresentam valores de cor verdadeira, turbidez e teor de sólidos suspensos relativamente baixos. O autor aponta valores máximos para o tratamento de 10 uT para turbidez e 5 uC para a cor verdadeira.

### **2.3 Filtração de Água por Membranas**

O processo de separação por membranas filtrantes é uma tecnologia difundida principalmente nas indústrias químicas, farmacêuticas, biotecnológicas e de alimentos. Nelas, as membranas são soluções para diversos problemas que envolvam filtração, separação ou clarificação. Seu uso em escala industrial ganhou espaço a partir da década de 70 com a difusão de sistemas que utilizavam o fluxo tangencial na passagem do fluído a ser filtrado. Até esse período, utilizava-se a filtração na qual o fluído a ser filtrado escoava perpendicularmente à superfície filtrante. Este sistema fazia com que uma grande quantidade de sólidos ficasse retida rapidamente na superfície do filtro, exigindo constante limpeza ou troca do filtro (ANDRADE, 2001).

VIEIRA (1999) define as membranas como uma barreira que separa duas fases e que restringe, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases. Esta barreira separa os materiais sem haver uma transformação química ou biológica de componentes durante o processo. Como forças motrizes para o transporte entre as fases, podem atuar diferenças de pressão, temperatura, concentração, e diferenças de potenciais elétricos. Após a passagem pela membrana, o líquido é chamado de permeado.

No tratamento de água, o uso de membranas filtrantes constitui, atualmente, a principal inovação tecnológica entre os processos utilizados. Por conta da capacidade das membranas em reter diferentes contaminantes não abrangidos pelos sistemas convencionais, como é o caso de micropoluentes orgânicos e inorgânicos de origem industrial, ou na dessalinização da água para o consumo humano por osmose reversa, sua utilização ganha notoriedade num cenário que prevê a constante preocupação na legislação dos países em estabelecer novas metas, mais restritivas, para a qualidade da água de consumo. Além da questão de proteção à saúde, o sistema se mostra como uma opção que não demanda a utilização de produtos químicos (exceto para sua limpeza

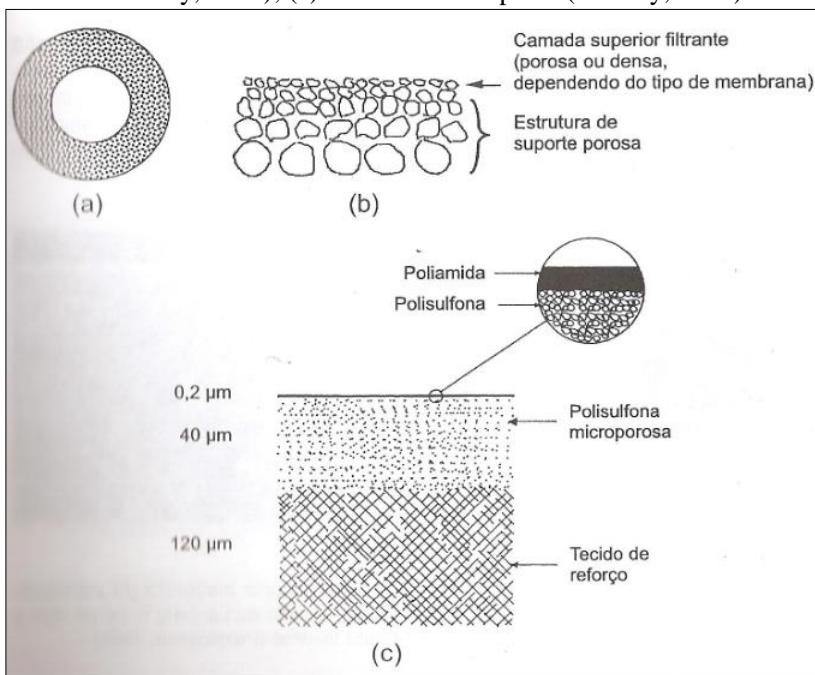
quando necessário) necessita de pouco espaço para operação em comparação ao sistema convencional, além de haver a possibilidade de automação do sistema, facilitando sua operação. Ainda, com o esgotamento de mananciais de água potável próximo a grandes centros urbanos, o reúso da água para fins não potáveis pode ser atendido pelas membranas filtrantes a um preço competitivo aos sistemas convencionais (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Os processos de membranas mais apropriados para obter uma água de qualidade desejável, dependem dos componentes a serem eliminados da água bruta. RIBEIRO e DE LUCA (1998) listam os componentes removíveis por membranas. São eles: material particulado microscópico (bactérias, algas, vírus, material coloidal), moléculas orgânicas (pesticidas, componentes de combustíveis, solventes, etc.), e íons (metais pesados, salinidade excessiva, dureza). Para a retenção de diferentes dimensões desses solutos e partículas, as membranas são classificadas, segundo MIERZWA (2008) em quatro categorias. Estas são: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. O mesmo autor aponta que na microfiltração são separadas partículas com diâmetros variando entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$ , sendo possível a retenção da matéria suspensa, protozoários, bactérias e a maioria dos vírus. A ultrafiltração retém partículas entre 0,001 a 0,1  $\mu\text{m}$ , compreendendo o material removido pela microfiltração, e ainda colóides e a totalidade dos vírus. Contudo, junto com adsorção sobre carvão ativado em pó, (CAP), a ultrafiltração pode também ser usada para eliminar moléculas orgânicas dissolvidas. A nanofiltração e a osmose reversa podem deter partículas do tamanho de um íon. A nanofiltração é normalmente usada para abrandamentos e, em parte, para desmineralizar água salobra ou pouco salina e a osmose reversa para desalinizar a água do mar ou águas salobras.

Hoje no mercado de saneamento básico são utilizadas principalmente membranas fabricadas com polímeros orgânicos, havendo também membranas inorgânicas feitas de alumínio, titânio ou aço inoxidável, que por terem um alto custo, são destinadas a tratamentos mais específicos, como no tratamento de soluções agressivas. SCHNEIDER e TSUTIYA (2001) não restringem a utilização de outros materiais para a fabricação de membranas. De acordo com os autores, qualquer material que permita a síntese de filmes com porosidade controlada pode ser utilizado.

A partir da escolha de um material, a organização do elemento filtrante pode ser feita de diferentes maneiras. As primeiras membranas eram simétricas com poros regulares que atravessavam toda a estrutura da membrana, não tendo boa produtividade pelo pouco volume ocupado pelos poros. Na segunda geração de membranas, estas eram fabricadas de forma assimétrica e com um mesmo material, onde uma fina película filtrante fica situada sobre uma estrutura mais grossa e mais porosa. Na terceira geração, as membranas denominadas compostas eram formadas por diferentes materiais, sendo um filme fino colocado sobre uma estrutura suporte, geralmente constituída por uma membrana assimétrica. Estas membranas predominam hoje no mercado pelo reduzido custo em relação às demais. A Figura 1 apresenta as três gerações de membranas.

Figura 1: As três gerações de membranas filtrantes orgânicas: membrana simétrica (Deshmkh & Leslie, 1999); (b) membrana assimétrica (Aptel & Buckley, 1996); (c) membrana composta (Bradley, 1993).

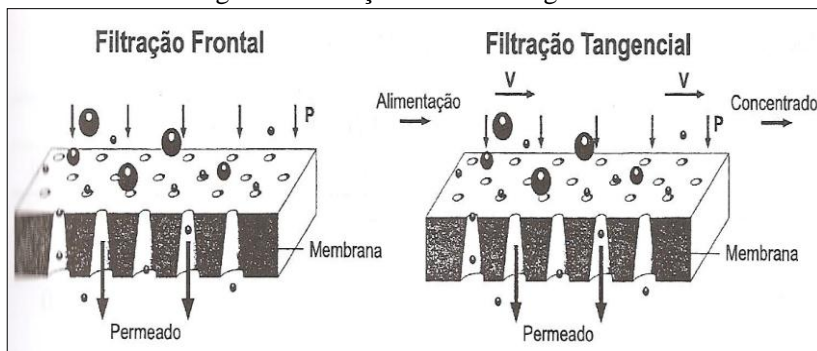


Fonte: SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.

De maneira geral, as membranas são estruturadas em um módulo responsável por dar suporte à filtração, de forma que não se acumule material retido. Também, espera-se evitar com ele a contaminação do permeado pelo material concentrado. Além do módulo, um sistema de membranas incluiu uma bomba para pressurizar a alimentação de fluido, uma válvula para regular a pressão na alimentação, um canal de coleta de permeado e outros elementos responsáveis pela limpeza de material acumulado no sistema.

O fluido pode ser bombeado através do módulo em direção paralela à membrana ou em direção perpendicular, como mostra a Figura 2. Na filtração tangencial o fluido concentrado é separado do permeado, diferente da filtração frontal. Com isso a filtração frontal apresenta maior rendimento, que é o quociente entre o fluxo de permeado dividido pelo fluxo de alimentação. Neste trabalho se utilizará a filtração frontal nos ensaios.

Figura 2: Filtração frontal e tangencial.



Fonte: LYONNAISE DES EAUX, 1999, *apud* SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.

## 2.3.1 Características das Membranas

### 2.3.1.1 Espessura

Em membranas, a resistência ao fluxo de um solvente irá depender de sua estrutura mais ou menos fechada e de sua espessura. Em membranas com as mesmas características morfológicas, quanto

maior a espessura da camada filtrante, maior a resistência ao fluxo e, menor será a taxa de filtração (VIEIRA, 1999). Segundo BUSTNES (2005) deve-se levar em conta na escolha de uma membrana filtrante, as propriedades mecânicas (rigidez, ductibilidade, fragilidade). O filtro deve resistir ao impacto mecânico da filtração repetida e das oscilações dos ciclos de limpeza.

No trabalho de CORRÊA (2002) se estudou membranas de madeiras de diferentes espessuras para o tratamento de água. O resultado evidenciou diferenças entre espessuras de 1, 2, 3 cm para a madeira pinus em relação a eficiência na remoção de impurezas da água e da pressão de trabalho utilizada. A redução dos parâmetros turbidez e cor foi em média 20% maior na membrana de 3,0 cm em relação a de 1,0 cm.

Para este trabalho determinou-se uma espessura padrão entre as amostras das diferentes madeiras entre 13 e 15 mm, pela necessidade de adaptação ao piloto de filtração frontal, e por se prever a fragilidade do elemento filtrante para pequenas espessuras.

#### **2.3.1.2 Porosidade**

A porosidade de um elemento filtrante é um parâmetro que representa a fração de espaços vazios presentes na estrutura do elemento. Um filtro deve apresentar uma porosidade suficiente para que não resulte em uma elevada resistência a passagem do fluído (VIEIRA, 1999). Ainda, quanto mais poroso o filtro, chega-se a maiores vazões de escoamento do fluído e com menor pressão, também mais longa será a vida útil do elemento filtrante.

A sua determinação pode ser feita através da relação entre a parte sólida e os poros da membrana, chegando-se a uma porcentagem do espaço vazio na camada superficial da membrana.

#### **2.3.1.3 Seletividade**

A seletividade de uma membrana é representada fisicamente pelo diâmetro dos poros. De acordo com ANDRADE (2001) a seletividade depende da distribuição desses diâmetros, não sendo possível encontrar membranas com um diâmetro único. A regularidade do diâmetro dos poros é importante para a eficiência das membranas na



retenção de material. A determinação do diâmetro médio dos poros pode ser dada pelos seguintes métodos:

- a) Medida direta com auxílio do microscópio eletrônico de varredura;
- b) Porosimetria de mercúrio;
- c) Porosimetria de deslocamento de líquido;
- d) Uso de soluções de polímeros polidispersos.

#### 2.3.1.4 Permeabilidade

A permeabilidade ( $J$ ) ou fluxo é uma variável que quantifica o volume de uma solução que atravessa a membrana. Ela depende da porosidade ( $f$ ) da membrana, do tamanho médio dos poros (raio médio,  $r_p$ ), da pressão de filtração ( $P_f$ ), da viscosidade absoluta da água ( $\mu$ ), da tortuosidade de seus poros ( $\theta$ ), e da espessura da membrana ( $\delta_m$ ) (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). A permeabilidade é inversamente proporcional à espessura da membrana e à tortuosidade de seus poros, diretamente proporcional à sua porosidade, e ao quadrado do diâmetro médio dos poros, segundo a equação a seguir:

$$J = fr_p^2 P_f / 8\mu\theta\delta_m \quad (\text{Equação 1})$$

Ainda, a permeabilidade pode ser definida pelo fluxo instantâneo, ou taxa de filtração. Ele permite comparar diferentes diâmetros de membranas em função do tempo de filtração e volume filtrado, e sua unidade é comumente expressa em  $L/hm^2$ , ou, simplificando,  $m/h$ . Em membranas de osmose inversa, a taxa de filtração varia de 20 a 60  $L/hm^2$ , de 60 a 500  $L/hm^2$  em membranas de ultrafiltração e acima de 1000  $L/hm^2$  em membranas de microfiltração (VIEIRA, 1999). Para determinar a taxa de filtração, pode-se utilizar medidas de fluxo permeado através da membrana, segundo a equação a seguir:

$$J = dV_p / Adt \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$J$ : fluxo instantâneo;

$V_p$ : volume do permeado;  
 $A$ : é a área de filtração da membrana;  
 $t$ : é o tempo de filtração;

A resistência imposta na filtração são os fatores internos (porosidade, tamanho médio dos poros, espessura, tortuosidade) e os fatores externos (pressão de filtração, viscosidade da água) que dificultam a passagem do fluxo pela membrana. Esta variável é importante na determinação do rendimento de uma membrana, e está definida pela equação a seguir:

$$J = P_f / \mu R_m \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$J$ : fluxo instantâneo;  
 $P_f$ : pressão de filtração;  
 $\mu$ : viscosidade dinâmica da água;  
 $R_m$ : resistência da membrana;

A permeabilidade e a resistência num ensaio de filtração devem ser avaliadas em função da pressão de operação. Esta variável é determinante para se dimensionar a operação de um tratamento, em termos de sua viabilidade e função. Um tratamento que requeira elevadas pressões de operação, utilizando-se de bombeamento para alimentação do fluido através da membrana, pode não ser viável num tratamento de água em pequena escala, como, por exemplo, em um filtro residencial. SCHNEIDER e TSUTIYA (2001) definem valores de resistência da membrana e pressões de operação, comumente utilizados na operação de membranas para saneamento básico:

Tabela 1: Resistência e pressão de operação de membranas utilizadas no saneamento básico.

Processo	Valores aproximados de resistência da membrana (m <sup>1</sup> )	Pressões de operação (atm)
microfiltração	10 <sup>6</sup>	0,3-1,5
ultrafiltração	10 <sup>7</sup>	0,5-1,5
nanofiltração	10 <sup>8</sup>	3,5-10
osmose reversa	10 <sup>10</sup>	8-80

Fonte: SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001

## 2.4 Madeiras

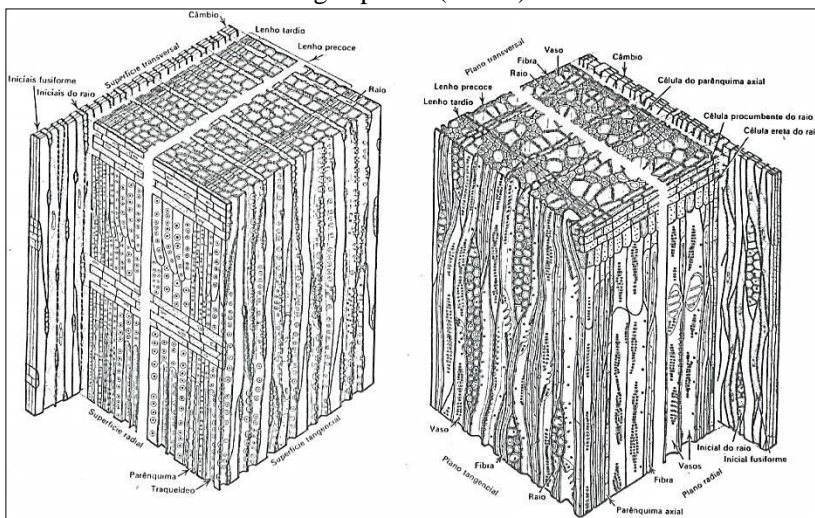
A palavra madeira é o nome designado para o produto dos tecidos vegetais integrantes do sistema vascular das árvores, denominado xilema secundário. Basicamente, o xilema secundário é constituído por elementos celulares compostos de celulose, hemicelulose e lignina. Este sistema vascular está presente na raiz e no caule, e tem como funções: o transporte de água e solutos, armazenamento de nutrientes e sustentação mecânica (MELO JÚNIOR, 2012).

De maneira geral, os vegetais que produzem madeira, podem ser agrupados em dois grupos distintos: gimnospermas e angiospermas. As gimnospermas apresentam como características distintivas a folhagem na forma de agulha e a ausência de frutos (sementes descobertas). As angiospermas, também chamadas de folhosas, é o grupo mais numeroso em termo de espécies, apresentam estruturas mais complexas em relação às gimnospermas, e, se distinguem pelas folhas largas e sementes encerradas em frutos (ROWELL, 2005; RAVEN *et. al*, 1996).

A heterogeneidade de células, formas, dimensões, arranjo e distribuição dos elementos celulares é tão significativa nos vegetais, que torna peculiar cada espécie ou grupo (MELO JÚNIOR, 2012). Conforme pode ser observado na Figura 3, em termos estruturais as madeiras de gimnospermas são relativamente simples, sendo compostas quase que totalmente por um único tipo de célula alongada (2-5 mm) denominada traqueídeos. Células transversais que compõem o raio e canais de resina também são encontrados. As madeiras de folhosas são estruturalmente mais complexas e apresentam maior diversidade de padrões de organização celular. Três tipos básicos de tecidos são

encontrados nesta categoria: aqueles que compõem os vasos, as fibras e as células do raio, que constituem o parênquima radial.

Figura 3: Lenho típico de uma conífera (esquerda) e de uma angiosperma (direita).



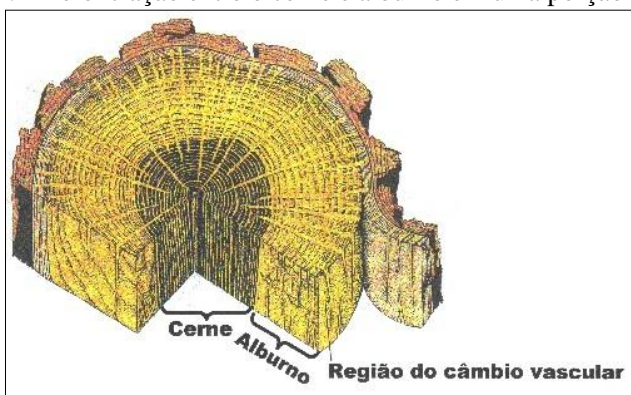
Fonte: ESAU, 1976, *apud* MELO JÚNIOR.

Nas madeiras de gimnospermas, os traqueídeos são células que servem ao transporte de água e nutrientes e também provém suporte mecânico. Por outro lado, as madeiras de folhosas apresentam células especializadas específicas para cada uma destas funções. Nelas, os vasos são responsáveis pela condução da seiva bruta e elaborada, e água, enquanto as fibras são os tecidos responsáveis pela sustentação. O raio é responsável pelo movimento radial de substâncias nutritivas e água, para ambos os grupos. (CARVALHO *et. al*, 2009; RAVEN *et. al*, 1996).

O seccionamento do tronco revela camadas concêntricas ao redor do centro, chamados de anéis de crescimento (Figura 4). Este conjunto de anéis representa a atividade cambial da planta no decorrer de um ano, sendo influenciado pelas variações dos períodos de seca e chuva. Em lugares que apresentam estações bem definidas, clima temperado, é possível avaliar a idade da árvore fazendo-se a contagem dos anéis de crescimento. No decorrer do desenvolvimento da árvore, ocorrem transformações relativas as funções desempenhadas pelas células. Parte

das células do xilema secundário se tornam inativas para o transporte de água e solutos, passando a constituir o cerne; enquanto as células que se mantêm funcionais são parte do alburno (ROWELL, 2005). RAVEN *et. al.* (1996), diferencia o cerne e o alburno, visualmente, pela posição e coloração de seus anéis de crescimento, estando o alburno na região mais externa do tronco, próximo à casca da árvore, e, apresentando coloração mais clara; enquanto o cerne tem seus anéis na região central do tronco, e, apresenta coloração mais escura pela presença de óleos, resinas e compostos fenólicos.

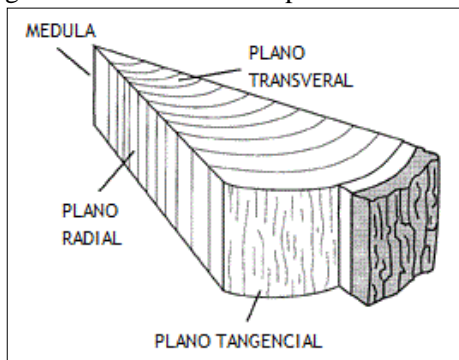
Figura 4: Diferenciação entre o cerne e alburno em uma porção de caule.



Fonte: RAVEN *et. al.* (1996).

Em função da complexidade estrutural apresentada pelo xilema secundário, sua observação exige o seccionamento da madeira em três planos de orientação: transversal, tangencial e radial (Figura 5).

Figura 5: Planos de corte típicos de madeiras.



Fonte: University of Kentucky Cooperative Extension Service, 1997.

Para este trabalho, o plano transversal, perpendicular ao eixo do tronco, é importante para observar a presença e o agrupamento dos vasos, traqueídeos e fibras. Também, o plano tangencial ou longitudinal radial, paralelo aos raios, deixa perceptível a abertura dos raios, ou, parênquima radial (MELO JÚNIOR, 2012). Vasos, fibras e raios compõem a porosidade do elemento filtrante. Eles serão tratados como poros grandes (vasos) e poros pequenos (fibras e raios) para o propósito de filtração de água.

É relevante a análise da porosidade em relação a tecnologia desenvolvida para a conservação de madeiras. Nela, as madeiras são infiltradas com líquidos preservantes sob pressão, e a efetividade da infiltração depende da permeabilidade nos vasos e fibras da madeira. SIAU (1984) aponta a facilidade de penetração de substâncias preservativas no alburno em comparação ao cerne. O autor explica que os materiais naturalmente presentes no cerne podem endurecer ou se solidificar, obstruindo aberturas dos vasos e canais resiníferos; nesse caso, o movimento dos preservativos é diminuído ou totalmente inibido. Segundo OLIVEIRA (1997), a quantificação da relação cerne/alburno é importante do ponto de vista tecnológico; dependendo da utilização que se queira dar à madeira, existe uma maior ou menor quantidade destes dois tipos de madeira que ocorre no tronco das árvores. De maneira análoga, presume-se que na escolha de madeiras para a finalidade de filtração deve-se optar por madeiras com maior quantidade de alburno em relação ao cerne para ter maior disponibilidade de elemento filtrante.

Ainda, deve-se selecionar a parte do tronco referente ao albúrnio para ter um elemento filtrante mais permeável à passagem de água.

Em nível microscópico, os vasos podem ser reconhecidos como as estruturas anatômicas mais significativas para a penetração dos preservativos na madeira no sentido paralelo, ou, longitudinal, pois apresentam maiores diâmetros em relação as fibras, formando o caminho de fluxo de menor resistência à passagem de líquidos (SIAU, 1984). As fibras das madeiras folhosas, apesar de serem menos importantes na penetração inicial de solução preservante, possuem papel fundamental na dispersão do líquido pela madeira, por constituírem a maior parte do tecido lenhoso e por atuarem quando os vasos estão obstruídos. A permeabilidade no sentido transversal é função dos raios. SILVA (2010), no entanto, não encontrou fluxo de líquidos ou ar no sentido transversal, tanto no cerne quanto no albúrnio, de duas espécies de eucalipto. Ele explica esse comportamento pela elevada presença de gomas e outros extrativos nas células de raio em algumas espécies de folhosas. Com isso, esse estudo considerou relevante avaliar o sentido perpendicular ou transversal de permeabilidade de água apenas em gimnospermas.

Segundo BRANDÃO (1989) a porosidade da madeira está diretamente relacionadas à sua densidade. A densidade é a quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, sendo expresso em  $\text{g/cm}^3$ . O autor ressalta que a densidade pode variar entre gêneros, espécies do mesmo gênero, árvores da mesma espécie e, até mesmo, entre diferentes partes da mesma árvore. RAVEN, EVERT e EICHHORN (1996) indicam que a variabilidade ocorre em função, principalmente da idade da árvore, genótipo, clima, localização geográfica e tratamentos silviculturais, como o distanciamento entre árvores. Internamente, uma maior espessura da parede das fibras e um menor diâmetro dos poros resultam em maior densidade da madeira.

Optou-se na escolha da madeira como elemento filtrante para este estudo, pela disposição natural de poros em seu tecido lenhoso, não sendo necessário processos de fabricação custosos para se obter uma membrana, como é o caso das membranas sintéticas utilizadas em tratamento de água. Ainda, a madeira é um material, renovável, moldável, abundante e fácil de obter, podendo estar acessível em lugares isolados, onde um tratamento alternativo para água é comumente requerido. Para a finalidade de caracterizar o elemento filtrante, este estudo abrange três diferentes madeiras encontradas na vegetação

brasileira. As espécies de árvores escolhidas foram as angiospermas, caixeta - *Tabebuia cassinoides* (LAM.) DC. - e garapuvu - *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake -, e, a gimnosperma, pinus - *Pinus elliottii* -. Suas características relevantes são descritas nos itens 2.4.1.1 a 2.4.1.3.

## **2.4.1 Espécies de Árvores Estudadas**

### **2.4.1.1 *Tabebuia cassinoides* (LAM.) DC**

A madeira caixeta, da espécie *Tabebuia cassinoides* (LAM.) DC, é uma árvore angiosperma pertencente à família das Biognoniaceas, família reconhecida pelos ipês. No Brasil ela é encontrada entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina, na floresta ombrófila densa (MELO JÚNIOR, 2012).

Características anatômicas (CARVALHO, 1994) e (MELO JÚNIOR, 2012):

- Densidade: 0,93 g/cm<sup>3</sup>
- Frequência de vasos:  $\leq 5$  vasos por mm<sup>2</sup>
- Diâmetro dos vasos: de 50 a 100  $\mu$ m

### **2.4.1.2 *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake**

A espécie *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, conhecida popularmente por garapuvu ou guarapuvu, é uma angiosperma pertencente a família das Fagaceae. Ocorre em floresta ombrófila densa, em climas tropical e subtropical. É uma árvore de grande porte (cerca de 30 metros) de crescimento rápido (MELO JÚNIOR, 2012).

Características anatômicas (CARVALHO, 1994) e (MELO JÚNIOR, 2012):

- Densidade: 0,65 g/cm<sup>3</sup>
- Frequência de vasos:  $\leq 5$  vasos por mm<sup>2</sup>
- Diâmetro dos vasos: de 50 a 200  $\mu$ m

### **2.4.1.3 *Pinus elliottii***

A espécie *Pinus elliottii*, é uma gimnosperma pertencente a família Pinaceae. Conhecida também por pinheiro, a árvore é originária do Hemisfério Norte em áreas de clima temperado. No Brasil, as



espécies de pinus são cultivadas para fins ornamentais e para a produção de papel e celulose. São causadoras de problemas ecológicos, como a bioinvasão, por se dispersarem com facilidade pelo vento e acabam contaminando áreas remanescentes de flora nativa. São de grande porte, com altura entre 18,0 e 30,0 m (MELO JÚNIOR, 2012).

Características anatômicas (CARVALHO, 1994) e (MELO JÚNIOR, 2012):

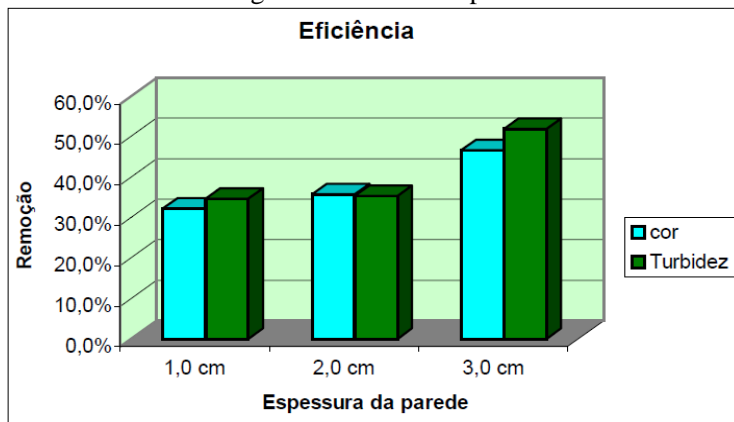
- Densidade: 0,48 g/cm<sup>3</sup>
- Frequência de vasos:  $\leq 5$  vasos por mm<sup>2</sup>
- Diâmetro dos vasos: de 100 a 200  $\mu$ m

#### **2.4.2 Filtração em Madeiras**

No trabalho de CORRÊA (2002), verificou-se a utilidade de diferentes madeiras como elemento filtrante para água. O estudo analisou a filtração frontal, perpendicular ao sentido de crescimento da árvore, através de membranas planas; e a filtração com escoamento tangencial, paralela ao sentido de crescimento da árvore, por membranas tubulares de diferentes espessuras.

Os resultados mostraram a baixa permeabilidade de água para a filtração frontal. As pressões utilizadas não foram suficientes para fazer a água fluir através das madeiras. Para a filtração com fluxo tangencial, paralela ao crescimento da árvore, utilizando a madeira pinus e diferentes espessuras de membranas, obteve-se uma redução dos parâmetros de turbidez e cor, como mostra a Figura 6. Sob uma pressão média de 24 m.c.a., chegou-se a uma taxa de filtração de 0,24 L/s.m<sup>2</sup>.

Figura 6: Relação entre espessura da parede e eficiência na filtração tangencial da madeira pinus.



Fonte: CORRÊA (2002).

O trabalho de CORRÊA (2002) demonstrou a eficiência da filtração das madeiras no sentido paralelo às fibras, ou ao crescimento da árvore, sentido com maior dimensão e quantidade de poros em relação ao sentido perpendicular às fibras. Ainda, é relevante a avaliação do comportamento do elemento filtrante em relação a efetividade de filtração de acordo com a espessura da membrana, e por ter obtido valores satisfatórios de pressão e taxa de filtração para o pinus, madeira utilizada nesse estudo.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se baseia basicamente em duas etapas, na observação das madeiras em microscopia eletrônica, e, no ensaio de filtração frontal e qualidade da água filtrada. Os detalhes destas etapas são descritos a seguir:

#### 3.1 Escolha das Madeiras

Para a escolha das árvores estudadas na pesquisa, levou-se em conta a disposição de árvores que fazem parte da vegetação brasileira, sendo elas nativas ou não. Desta forma, visou-se propiciar o desenvolvimento no Brasil de futuros estudos sobre o tema, e ainda facilitar a obtenção delas para o trabalho.

Para o objetivo de filtração, pensou-se na escolha de madeiras com diferentes densidades, o que resulta numa variação da permeabilidade de água no elemento filtrante. Um elemento filtrante menos denso, apresenta menor resistência à passagem de água, e consequentemente menor pressão de trabalho. Trabalhando com menores pressões, pode não ser necessário um bombeamento de água na filtração, e, assim, reduzir custos numa futura aplicação da pesquisa. Contudo, um elemento filtrante menos denso e mais permeável, pode resultar em uma filtração ineficiente.

As madeiras que produzem tecido lenhoso estão compreendidas em dois grandes grupos na natureza, as angiospermas e gimnospermas. Devido às diferenças de organização da estrutura dos tecidos das plantas que constituem esses grupos, decidiu-se selecionar árvores pertencentes aos dois grupos. Assim foram selecionadas as angiospermas das espécies *Tabebuia Cassinoides* e *Schizolobium parahyba*, e a gimnosperma *Pinus elliotti*.

As três árvores escolhidas para a pesquisa foram extraídas da natureza por uma empresa de desmatamento de árvore em florestas do estado de Santa Catarina. Elas estavam sujeitas a condições semelhantes de temperatura e umidade. Também se observou o estado de desenvolvimento das árvores, estando todas em desenvolvimento completo de seus ciclos de vida. As madeiras foram então seccionadas em toras (Figura 7) e levadas ao LAPOÁ (Laboratório de Potabilização das Águas) onde foram armazenadas.

Figura 7: Tora das madeiras pinus, garapuvu e caixeta.



Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.2 Caracterização por Microscopia Eletrônica

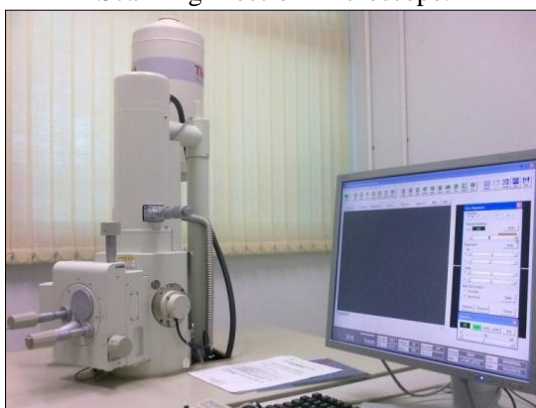
A utilização da microscopia eletrônica para a caracterização das madeiras escolhidas no trabalho tem por objetivo evidenciar a presença de poros nas madeiras estudadas, no sentido paralelo ao crescimento da árvore e, no caso do *pinus elitotti*, também no sentido perpendicular ao crescimento. Com a aproximação das imagens obtidas na microscopia eletrônica e as escalas de tamanho referentes à aproximação, é possível dimensionar o diâmetro dos poros grandes e pequenos de cada amostra de madeira, além de enumerar a quantidade de poros por área visualizada.

Pelo dimensionamento dos poros será possível chegar a conclusões da faixa de filtração das madeiras estudadas, se elas se caracterizam como uma microfiltração, ultrafiltração ou nanofiltração. Já a quantificação dos poros, dará a possibilidade de se comparar a porosidade de cada madeira.

As análises de microscopia eletrônica foram realizadas através da estrutura disponível aos alunos de pesquisa do LCME (Laboratório Central de Microscopia Eletrônica). Este laboratório, que está situado no campus da Universidade Federal de Santa Catarina, após a aprovação pelo comitê técnico de um formulário que deve ser preenchido com as características do projeto, arca com os custos e operação da análise de microscopia e da preparação de recobrimento das amostras.

O LCME utiliza o equipamento JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope (Figura 8). Esse aparelho, comumente utilizado em análises biológicas por ter a possibilidade de analisar amostras com altos níveis de água, permite aproximações de até 300.000 vezes o tamanho normal. Ele é composto de uma câmara central onde são dispostas as amostras, uma tela de computador onde é projetada a imagem do aparelho e um controlador manual para movimentar as imagens projetadas e aproximar ou diminuir as visualizações.

Figura 8: Aparelho de microscopia eletrônica JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope.



Fonte: Arquivo pessoal.

### **3.2.1 Preparação das Amostras**

As amostras para serem analisadas em microscopia eletrônica devem ser preparadas com cuidados específicos e segundo recomendações do próprio Laboratório Central de Microscopia Eletrônica. Os técnicos do LCME aconselham uma desidratação das amostras para ter uma melhor condução elétrica na análise, e, para facilitar o vácuo de ar na câmara de observação do aparelho. Os técnicos também são responsáveis pelo cobrimento com ouro da camada que se pretende enxergar da superfície das amostras, o que permite que as imagens sejam projetadas pelo aparelho na tela de um computador. Outro cuidado que deve ser levado em conta é a respeito do corte das amostras de madeira. A estrutura da madeira é frágil e sensível quando

observada nas aproximações obtidas na microscopia eletrônica, e um corte indevido pode danificar e obstruir os poros a serem visualizados.

Para a seleção das amostras foram retirados cubos com dimensões de aproximadamente 1 cm x 1 cm x 1 cm (Figura 9), do interior das toras das madeiras selecionadas, com um corte de estilete para não danificar os poros. Após a secção dos cubos, eles foram identificados com o lado correto a ser visto na microscopia e com o tipo da madeira.

Para o ressecamento das amostras, elas foram mantidas a 70°C numa mufla pertencente ao LAPOÁ (Laboratório de Potabilização das Águas) por um período de 22 horas antes de serem levadas ao cobrimento de ouro.

As amostras foram então levadas ao LCME, em um compartimento fechado e com sílica pra evitar um ganho de umidade, e, foram cobertas com ouro pelos técnicos do LCME. Após o cobrimento, as amostras foram mantidas novamente em estufa até o dia da análise microscópica.

Figura 9: Amostras das madeiras após corte e cobrimento de ouro.



Fonte: Arquivo pessoal.

### **3.2.2 Análise de Microscopia Eletrônica**

As amostras das madeiras foram fixadas em um anteparo que se encaixa a base do aparelho, dentro da câmara de observação. As imagens foram projetadas na tela do computador, e, com o controlador manual foram determinadas aproximações iguais para as três amostras no sentido de poros paralelos ao crescimento da árvore; e uma

aproximação específica para o sentido perpendicular nos poros menores da espécie *Pinus elliottii*. Num total de quatro imagens por amostra, elas foram selecionadas visando ter uma visão geral da estrutura da madeira (aproximação de 22x); uma aproximação para se ter uma contagem da quantidade de poros numa determinada área (aproximação de 50x); e para se ter a dimensão dos poros grandes e pequenos (aproximações de 250x e 500x/1000x). As imagens obtidas na microscopia eletrônica encontram-se no item 7 do Anexo 1 deste trabalho.

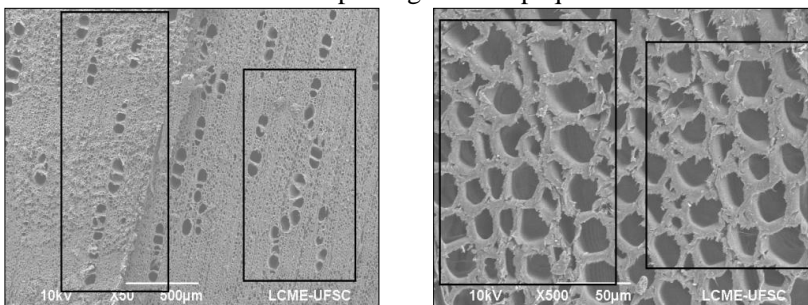
### **3.2.3 Determinação da Porosidade e Diâmetro dos Poros**

A determinação da quantidade e diâmetro dos poros foi realizada a partir da análise das imagens obtidas na microscopia eletrônica e pelo software ImageJ, que permite obter medidas de dimensões em imagens. Os resultados foram plotados em uma tabela comparativa das espécies de madeiras estudadas, e foram obtidos valores totais de poros por unidade de área, e, um diâmetro médio dos poros de cada madeira.

Para a determinação do diâmetro dos poros, uma ampliação favorável à visualização dos poros e comum a todas as madeiras, foi selecionada entre as imagens obtidas na análise de microscopia eletrônica. Estabeleceu-se então em cada imagem uma área retangular (Figura 10 e Figura 11), onde cada poro teve seu diâmetro medido. Com as informações referentes à dimensão dos poros foi possível estabelecer uma contagem e uma média dos diâmetros dos poros, além da densidade do número de poros por unidade de área. Assim, foi possível também medir a porosidade como o somatório da área dos poros dividido pela área total da superfície da amostra.

Na análise das imagens foi considerada a distinção entre poros grandes e pequenos, utilizando-se de uma aproximação adequada ao tamanho dos poros (50x para poros grandes e 500x para poros pequenos). Para a madeira pinus, as estruturas semelhantes aos poros grandes das angiospermas, são canais resiníferos, tendo sido desconsiderados na contagem.

Figura 10 e Figura 11: Delimitação das áreas para a determinação do diâmetro dos poros grandes e pequenos.



Fonte: LCME (Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFSC).

### 3.3 Ensaio em Sistema de Filtração Frontal

A filtração frontal é aquela que o escoamento e a filtração de água ocorrem no mesmo sentido. Isso quer dizer que o escoamento da água juntamente com a filtração é realizado ortogonalmente à superfície que serve como elemento filtrante.

O ensaio consiste na adaptação de amostras das madeiras estudadas junto a um piloto utilizado em filtração por membranas. Pelos poros das amostras de madeiras, nos sentidos perpendicular e paralelo ao crescimento da árvore, m volume de água preparada para o ensaio, com o auxílio de uma pressão proporcionada por um cilindro de ar comprimido acoplado ao sistema, passa pelos poros em bateladas.

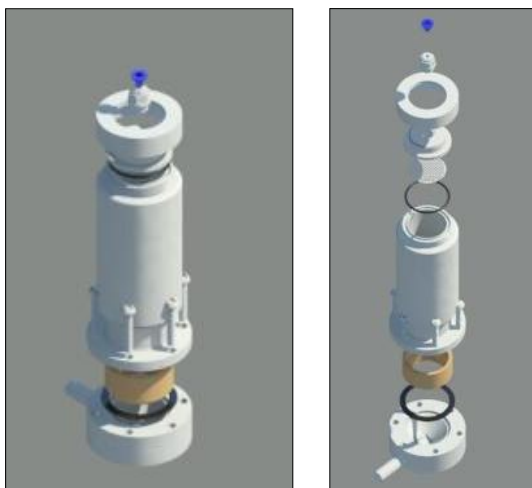
Com este ensaio será possível determinar a capacidade das diferentes madeiras estudadas em eliminar contaminantes presentes na água, além de determinar as pressões de trabalho necessárias à passagem da água, um comparativo entre os dois sentidos (perpendicular e paralelo ao crescimento da árvore) propostos de escoamento da água no interior do tecido lenhoso, e as vazões de filtração.

O sistema piloto utilizado (Figura 12 e Figura 13) foi elaborado exclusivamente para ensaios laboratoriais de filtração frontal. O mesmo pode ser utilizado para ensaios de membranas com a finalidade de tratamento de água para abastecimento, ou, de água residuária. O sistema piloto foi emprestado do LARA (Laboratório de Reuso de Águas), em parceria com o LAPOÁ (Laboatório de Potabilização das Águas). Este sistema é composto por peças usinadas em aço inoxidável,



elaborado anteriormente através de projeto (desenhos e dimensionamento) do próprio LARA. De maneira geral, faz parte do sistema, um bico para se acoplar um cilindro de ar pressurizado; uma câmara onde se coloca a água a ser tratada; uma superfície para se colocar o elemento filtrante; um bico de saída da água filtrada; além de borrachas de vedação e parafusos de regulação da estrutura. Esse sistema funciona em batelada, onde um volume determinado é utilizado na carreira de filtração.

Figuras 12 e 13: Desenho tridimensional do piloto de filtração frontal.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para a realização do ensaio é necessário uma pressão de injeção de água no piloto. Para isso foi encomendado um cilindro de ar pressurizado o qual foi acoplado por uma mangueira no orifício superior do piloto, conforme pode ser visto nas figuras a seguir.

Figuras 14 e 15: Cilindro de ar pressurizado ligado ao piloto de filtração.



Fonte: Arquivo pessoal.

### **3.3.1 Preparação das Amostras das Madeiras Utilizadas no Sistema Piloto de Filtração Frontal**

As amostras foram cortadas do interior das toras das madeiras selecionadas, utilizando-se da ferramenta serra-copo (Figura 16) para retirada num formato cilíndrico, e cortada em seus lados inferior e superior por uma serra de corte de madeira convencional. Levou-se em conta no corte a disposição dos sentidos desejados na filtração, um diâmetro possível de encaixar no sistema piloto, e uma espessura comum a todas as amostras e que suporte fisicamente as cargas de forças exigidas na filtração.

Figura 16: Corte com a ferramenta serra-copo das amostras de madeira.



Fonte: Arquivo pessoal.

No total, foram selecionadas doze amostras das madeiras (Figura 17), sendo metade delas orientadas no sentido paralelo ao crescimento das fibras, e a outra metade no sentido perpendicular. Também, se preveu que metade das amostras seriam levadas a um tratamento de autoclavagem com o intuito de retirar possíveis contaminantes presentes na estrutura das madeiras pela exposição das amostras ao vapor de água em alta pressão.

Para a autoclavagem das amostras de madeiras, utilizou-se de um equipamento do tipo autoclave vertical, disponível no LIMA (Laboratório Integrado de Meio Ambiente). Nele, as amostras foram inseridas e expostas a um tempo de 25 minutos para que a água aquecesse e a pressão desejada de 120 kgf/cm<sup>2</sup> fosse atingida. Após a estabilização da pressão, as madeiras foram mantidas por mais 20 minutos até que o equipamento fosse desligado e posto a esfriar.

Figura 17: Amostras para ensaio de filtração frontal.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após o corte e a autoclavagem de metade das amostras, elas foram colocadas para secagem em uma mufla, disponível no LAPOÁ (Laboratório de Potabilização das Águas), onde foram mantidas a uma temperatura de 70°C por um período de 48 horas. Com isso as amostras iniciaram os testes em condições mais semelhantes de umidade.

### **3.3.2 Preparação da Água Bruta e Análises de Qualidade da Água**

Para o ensaio de filtração frontal, se utilizou da água fornecida pela empresa de distribuição pública de água CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento), com uma adição de argila para evidenciar os resultados da filtração. A água bruta, resultante da adição de argila à água fornecida pela CASAN, foi analisada com o auxílio de equipamentos de caracterização de águas, disponíveis nos laboratórios LAPOÁ (Laboratório de Potabilização das Águas) e LIMA (Laboratório Integrado de Meio Ambiente).

Os resultados dos parâmetros de qualidade da água analisados estão descritos na Tabela 2, a seguir, e evidenciam uma água não potável de acordo com os padrões estabelecidos pela Portaria 2.914 do Ministério da Saúde.

Tabela 2: Padrões de qualidade da água bruta para o ensaio de filtração frontal.

Amostra	pH	Condutividade (uS/cm)	Cor ap. (uH)	Turbidez (NTU)	Temperatura (°C)	Sólidos diss. (ppm-mg/L)
Água bruta	6,77	70	45	12	20,6	35

Os parâmetros de qualidade de água analisados antes e depois da água passar pelos filtros foram: absorbância, cor aparente, turbidez e condutividade. Estes parâmetros são comumente aplicados em qualidade da água, com exceção da absorbância que pretende analisar a possibilidade de um contaminante orgânico presente nas amostras de madeira se desprender e contaminar a água filtrada. Segue os equipamentos utilizados:

- pHmetro: Orion pH meter-PerpHect Log, model 330;

O equipamento foi calibrado com soluções de pH 4 e pH 7.

- Espectrofotômetro portátil: Hach DR 2800;

O equipamento foi calibrado com água ultra pura; foi selecionado o método 8.025 para a cor aparente e os resultados são dados em unidades de platina cobalto (mg Pt-Co/L), também chamada de Unidade Hazen (Uh).

- Turbidímetro: 2100P Hach;

O equipamento foi calibrado, sendo o resultado das medições dados em UT (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

- Análise de sólidos totais dissolvidos: Pocket Pal STD Tester Hach.

Com o objetivo de simular o processo de tratamento convencional de estações de tratamento de água e acentuar a filtração da água em relação aos parâmetros cor aparente e turbidez, a água bruta foi coagulada com sulfato de alumínio ( $Al_2SO_4$ ) a partir de dosagens estabelecidas pelo Jar-Test (Figura 18), disponível no LAPOÁ.

Figura 18: Ensaio de Jar-Test para apreparação de água coagulada.



Fonte: Arquivo pessoal.

Foram adicionados em jarros de 2 litros de água bruta, as quantias de 8 ml de sulfato de alumínio a 1% (10g/L) e 8 ml de solução de cal a 0,5%. A água coagulada preparada apresentou uma diferença nos parâmetros de qualidade da água em relação à água bruta, resultando em valores de 70 uH para a cor aparente, e de 10 NTU para turbidez.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das madeiras pela microscopia eletrônica de varredura evidenciou a presença de poros no sentido longitudinal, ou, plano transversal, em todas as amostras. Os poros foram distinguidos entre poros grandes e pequenos, havendo uma predominância de poros pequenos em todas as madeiras. No sentido perpendicular, ou, plano tangencial, foi possível verificar a presença de poros pequenos na madeira pinus, porém, em menor quantidade.

A pesagem e a medida das dimensões das amostras de madeira indicam uma variabilidade de densidade aparente entre as madeiras estudadas, o que atende ao propósito de estabelecer uma relação entre a densidade das madeiras com os resultados de filtração de água. Os resultados da determinação da quantidade de poros evidenciaram a relação inversa entre densidade aparente e porosidade. A diferença de densidade aparente entre a caixeta (0,59 g/cm<sup>3</sup>) e o garapuvu (0,30 g/cm<sup>3</sup>) é significativa, enquanto, o pinus apresentou densidade intermediária, como mostra a Tabela 3. Os resultados da densidade aparente se mostraram diferentes em relação às pesquisas bibliográficas pela medição ter sido feita apenas para uma parte seccionada do tronco, sendo que, a densidade varia na seção transversal e longitudinal de um tronco (RAVEN *et. al.*, 1996).

Tabela 3: Características das amostras das madeiras analisadas.

Amostra	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Densidade ap. (g/cm <sup>3</sup> )
Pinus (paralelo)	7,00	13	39	0,45
Pinus (transveral)	9,13	13	41	0,53
Garapuvu	5,04	14	39	0,30
Caixeta	10,10	15	38	0,59

Pela medição do diâmetro médio dos poros foi possível determinar a faixa de filtração que se classificam as madeiras. Seus diâmetros médios, para os poros pequenos, variaram entre 0,013 mm (caixeta) e 0,026 mm (pinus), indicando que tais madeiras estão, segundo a classificação dos processos de tratamento de água por membranas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001), pouco acima do corte de

microfiltração (entre 0,0001 e 0,01 mm). A Tabela 4 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 4: Resultado da análise dos poros das madeiras.

		Poros pequeno	Poros grande
<b>Pinus</b>	Diâmetro médio (mm)	0,026	-
	Porosidade (%)	41,811	-
	Densidade de poros (poro/mm <sup>2</sup> )	783,818	-
<b>Garapuvu</b>	Diâmetro médio (mm)	0,018	0,259
	Porosidade (%)	65,147	
	Densidade de poros (poro/mm <sup>2</sup> )	1935,205	2,315
<b>Caixeta</b>	Diâmetro médio (mm)	0,013	0,062
	Porosidade (%)	30,801	
	Densidade de poros (poro/mm <sup>2</sup> )	6803,334	227,732

Como consequência da medida do diâmetro dos poros pequenos e grandes, as madeiras apresentam uma relativa densidade de poros e porosidade. A madeira caixeta teve o menor diâmetro médio de poros, para os poros grandes e pequenos, seguida pelo garapuvu e o pinus. A caixeta apresentou maior densidade de poros e uma menor porosidade. O pinus, apesar de ter um maior diâmetro médio dos poros pequenos em relação ao garapuvu, tem menor porosidade, isso se deve aos canais resiníferos no pinus terem sido desconsiderados na contagem por não serem condutores de água. A ausência de poros grandes (vasos) na madeira pinus, e a consequente regularidade do diâmetro de seus poros pequenos (traqueídeos), é uma característica relevante das madeiras de gimnospermas para a eficiência das membranas na retenção de material. Segundo ANDRADE (2001) é desejável a uniformidade dos poros para a seletividade da filtração.

O resultado da análise de qualidade da água filtrada pelas amostras de madeiras (Tabela 5) evidenciou a funcionalidade das madeiras como elemento filtrante para a água. A água filtrada pelas madeiras pinus (sentido paralelo e transversal) e caixeta, apresentou uma redução dos parâmetros físicos turbidez e cor aparente. Para a garapuvu, houve um acréscimo de todos os parâmetros analisados. Os parâmetros sólidos dissolvidos e condutividade aumentaram para todas as águas filtradas em relação à água bruta.



Tabela 5: Resultado da filtração de água coagulada nas diferentes amostras de madeira e as condições da água pré-filtração.

<b>Amostra</b>	<b>pH</b>	<b>Condutividade (uS/cm)</b>	<b>Cor ap. (uH)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Sólidos diss. (ppm-mg/L)</b>
Água bruta	6,77	70	45	12	35
Água coagulada	-	122	70	10	61
Pinus (paralelo)	6,66	118	23	3	59
Pinus (transveral)	6,71	118	34	4	59
Garapuvu	7,51	128	84	12	64
Caixeta	7,2	144	17	2	72

Em comparação ao que estabelece a Portaria Nº 2.914 do Ministério da Saúde (Tabela 6), que trata dos padrões de qualidade de uma água para o consumo humano, a água filtrada pelas amostras das madeiras pinus e caixeta, se apresentou dentro do estabelecido para os parâmetros analisados, com exceção da cor aparente. Mesmo acima do estabelecido, a cor aparente teve significativa redução, baixando de 70 uH na água coagulada para 23 e 17 uH, na água filtrada pelas amostras de pinus (sentido transversal) e caixeta, respectivamente. A água filtrada pela madeira garapuvu apresentou valores de turbidez e cor aparente mais elevados em relação a água coagulada.

Tabela 6: Limites estabelecidos pela Portaria Nº 2.914 do Ministério da Saúde dos padrões de qualidade para a água de consumo humano.

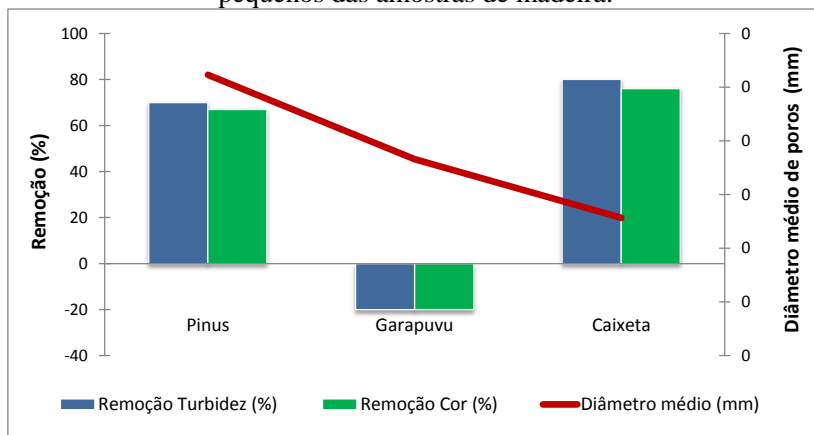
<b>pH</b>	<b>Cor aparente (uH)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Sólidos diss. (ppm-mg/L)</b>
6 a 9,5	15	5	1000

No ensaio de filtração frontal, as madeiras pinus e caixeta removeram de forma significativa os parâmetros de turbidez e cor aparente (60 a 80%), enquanto o garapuvu piorou cerca de 20% a condição inicial da água (Gráfico 1). O resultado da eficiência de remoção dos parâmetros cor e turbidez entre as madeiras garapuvu e caixeta deve ser atribuído pela dimensão dos poros grandes e pequenos. As madeiras têm valores semelhantes entre poros pequenos, porém, os

poros grandes do garapuvu, em média, apresentam um diâmetro cerca de quatro vezes maior que a caixeta. O maior valor relativo da dimensão do poro grande do garapuvu eleva o filtro a uma faixa de filtração muito acima da microfiltração, facilitando o escoamento da água apenas pelo poro grande. Neles, as partículas coaguladas, em suspensão na água, não são retidas, prejudicando a eficiência do elemento filtrante.

Tais resultados servem para estimar as características relevantes dos poros das madeiras no processo de filtração. O diâmetro médio dos poros pequenos das madeiras variando entre 0,013 e 0,026 mm se mostrou efetivo na retenção de partículas no elemento filtrante. A elevada porosidade do garapuvu (65%), juntamente com a diferença acentuada entre as dimensões dos diâmetros de seus poros pequenos e grandes, não proporcionaram uma filtração eficiente. Deve-se também considerar que a madeira pinus apesar de apresentar entre as madeiras estudadas o maior valor médio de diâmetro dos poros pequenos, ela não apresenta poros grandes, o que favorece a eficiência na remoção de contaminantes.

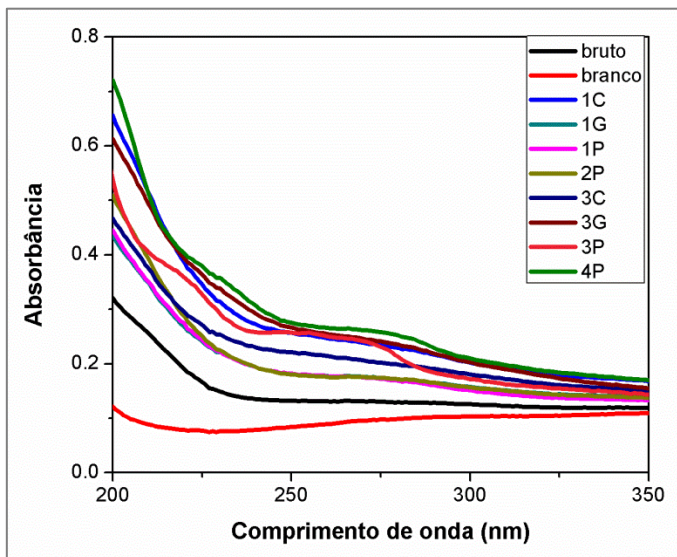
Gráfico 1: Remoção de turbidez e cor aparente e o diâmetro dos poros pequenos das amostras de madeira.



O tratamento prévio das amostras por autoclavagem se mostrou ineficiente para remover possíveis contaminantes à água, presentes naturalmente nas estruturas internas das madeiras. Na análise de absorvância da água filtrada, a presença de contaminantes não se mostrou alterada pela autoclavagem das amostras para um comprimento

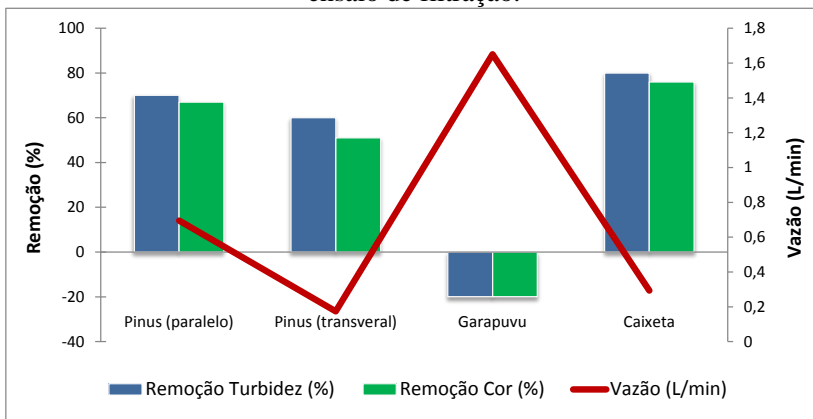
de onda variando entre 200 e 350 nm. Para os resultados finais deste estudo, as amostras de madeira autoclavadas foram desconsideradas. O gráfico a seguir demonstra os resultados de absorvância da água filtrada pelas três madeiras, sendo metade delas autoclavadas (3P, 4P, 3G, 3P), a água bruta e o branco.

Gráfico 2: Análise de absorvância.



De maneira análoga a porosidade, a vazão de água no ensaio de filtração é inversamente proporcional a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente da água, como mostra o Gráfico 3. A vazão de água percolada é fundamental para se avaliar a taxa de filtração de um filtro e assim determinar a utilidade para que este se destinará. Uma alta taxa de filtração indica uma maior facilidade da água em percolar através do elemento filtrante, e, juntamente com a retenção de partículas, se avalia a eficiência de um filtro. Entre as madeiras estudadas, o pinus no sentido transversal, a caixeta e o pinus no sentido paralelo, obtiveram, respectivamente, os menores valores de vazão de água percolada, e, conseqüentemente, menores taxas de filtração. Em contrapartida, o garapuvu teve uma vazão aproximadamente cinco vezes maior que a da caixeta, porém, com baixa eficiência de remoção de partículas. O resultado é exposto no Gráfico 3, a seguir:

Gráfico 3: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a vazão no ensaio de filtração.



As pressões mínimas de trabalho necessárias para escoar a água através de cada elemento filtrante foram registradas pelo manômetro presente no cilindro de ar pressurizado. Ela foi estabelecida a partir do momento em que, com o aumento da pressão, a água deixava de gotejar na saída do piloto de filtração, e passava a apresentar um fluxo contínuo. Essa análise é feita juntamente com a medição do tempo que o volume de água proposto leva para escoar através das amostras de madeira.

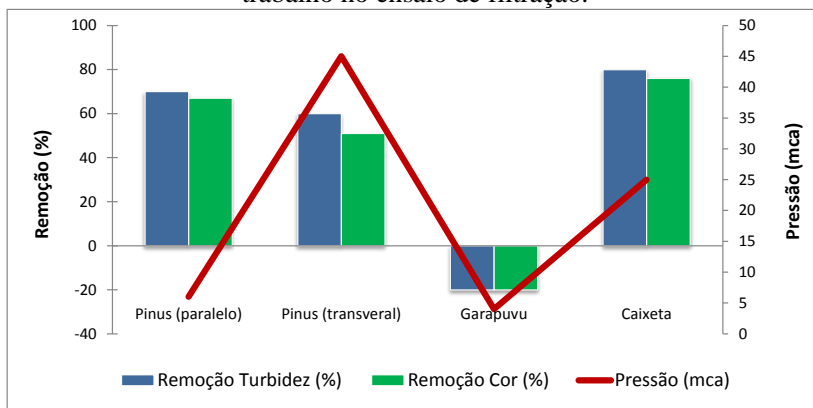
Verificou-se uma variação das pressões necessárias para o escoamento de água para cada tipo de madeira (Tabela 7), e, no caso do pinus, uma diferenciação entre os sentidos dos poros paralelo e transversal. As madeiras de maior densidade aparente e menor porosidade obtiveram valores mais elevados de pressão mínima de trabalho e tempo. O garapuvu se mostrou a madeira que menos exigiu pressão de trabalho e tempo para o escoamento de água, enquanto a caixeta teve os maiores valores, como se pode verificar na tabela abaixo. Em relação aos valores de referência da pressão de trabalho, indicados por SCHNEIDER e TSUTIYA (2001) para um tratamento de água em membranas de microfiltração, as madeiras garapuvu e pinus (sentido paralelo) estiveram dentro da faixa de valores usualmente utilizados (3 a 15 m.c.a).

Tabela 7: Resultado das pressões de trabalho, tempo de filtração e resistência da membrana.

Amostra	Pressão mín. de trabalho (mca)	Tempo (s)	Resistência (m <sup>-1</sup> )
Pinus (paralelo)	6	19	6,82x10 <sup>9</sup>
Pinus (transveral)	45	76	2,26x10 <sup>11</sup>
Garapuvu	4	8	1,92x10 <sup>9</sup>
Caixeta	25	45	6,39x10 <sup>10</sup>

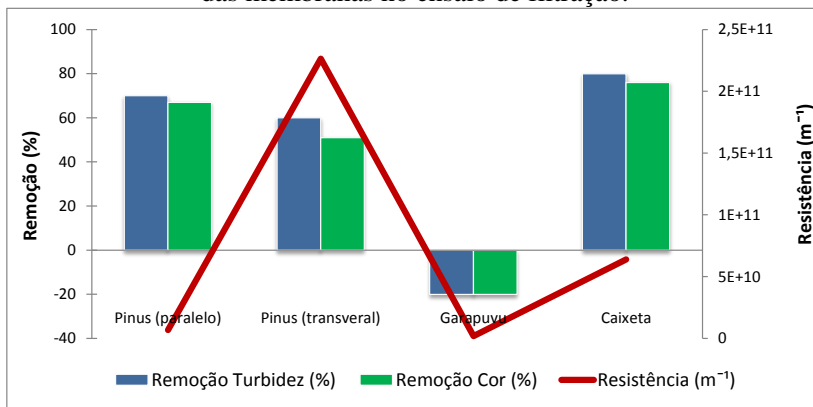
A análise da pressão de trabalho utilizada na filtração é uma importante variável para se determinar a finalidade e a viabilidade do tratamento de água. Um filtro que requer altas pressões de trabalho pode não ser viável economicamente para um tratamento de água em pequena escala, como por exemplo, na utilização como filtro residencial. Por isso deve-se avaliar a exigência de pressão de trabalho juntamente com a efetividade de remoção de partículas, e as possibilidades de uso do elemento filtrante. No Gráfico 4 é possível observar as diferenças de pressões utilizadas em cada ensaio de filtração, e a relação direta entre a pressão de trabalho e a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente.

Gráfico 4: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a pressão de trabalho no ensaio de filtração.



Os resultados de pressão de trabalho e vazão podem ser resumidos pela variável resistência, calculada pela Equação 3. As madeiras com maior resistência requereram maior pressão de trabalho e obtiveram menor vazão de permeado, como mostra o Gráfico 5. A diferença significativa entre os resultados da resistência é resultante do diâmetro médio dos poros das madeiras, que é inversamente proporcional ao quadrado da resistência. Os valores de resistência obtidos nos ensaios (Tabela 7) ficaram acima dos usuais utilizados em membranas de microfiltração para o tratamento de água, que estão em torno de  $10^6 \text{ m}^{-1}$  SCHNEIDER e TSUTIYA (2001). Pode-se atribuir os maiores valores de resistência ao uso de membranas de grande espessura. Também, neste trabalho não houve distinção entre o cerne e o albúrnio no momento de sectionar as membranas do tronco das madeiras, sendo essa uma característica relevante na permeabilidade da madeira. SIAU (1984), afirma que a facilidade de penetração de fluídos preservantes no albúrnio, em relação ao cerne, é maior.

Gráfico 5: Remoção de turbidez e cor aparente em relação a resistência das membranas no ensaio de filtração.



Ao utilizar uma água tratada proveniente da rede pública de abastecimento no ensaio de filtração verificaram-se alterações pouco significativas dos parâmetros de qualidade da água (Tabela 8). A turbidez da água tratada foi reduzida após a filtração em todas as amostras. Esse resultado evidencia o propósito da microfiltração em reter sólidos em suspensão da água. Os resultados da cor aparente e sólidos dissolvidos se mantiveram estáveis ou pioraram depois da filtração, por conta da

impossibilidade da microfiltração em reter sólidos dissolvidos. Ressalta-se que a água pré-filtração, estando em condições potáveis para o consumo humano, torna os resultados menos evidentes ou piorados pelas possíveis partículas desprendidas do elemento filtrante.

Tabela 8: Resultado da filtração de uma água tratada pela rede pública ao ser filtrada pelos filtros de madeira.

<b>Amostra</b>	<b>Cor aparente (uH)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Sólidos diss. (ppm-mg/L)</b>
Água tratada	12	2,64	36
Pinus (paralelo)	12	1,9	38
Pinus (transveral)	33	2,37	36
Garapuvu	15	2,49	48
Caixeta	12	2,23	35
Limite Portaria Nº 2.914	15	5	1000

Os poros das madeiras utilizadas permitem a filtração de partículas em suspensão, sendo aconselhada a coagulação da água pré-filtrada, ou, a associação das membranas com um pós-tratamento da água, usando, como exemplo, o carvão ativado, sugerido por SCHNEIDER e TSUTIYA (2001) para a retenção de sólidos dissolvidos em tratamentos com membranas de microfiltração.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados possibilitaram uma comparação entre as madeiras estudadas sob o aspecto de determinar as características das madeiras que às tornam aptas à filtração de água, de acordo com a finalidade do tratamento.

Com relação a água filtrada, a garapuvu se mostrou ineficiente na redução dos parâmetros de qualidade da água, enquanto o pinus e a caixeta deixaram a água dentro dos padrões de consumo humano para os parâmetros turbidez, cor aparente e sólidos dissolvidos.

Na análise de absorbância, não houve modificação significativa da água bruta por conta de contaminantes desprendidos pelas madeiras na filtração. Nesta análise também não foram identificadas diferenças no tratamento prévio das madeiras por autoclavagem.

O diâmetro médio dos poros pequenos das madeiras variando entre 0,013 e 0,026 mm se mostrou efetivo na retenção de partículas no elemento filtrante.

A elevada porosidade do garapuvu (65%), juntamente com a diferença acentuada entre as dimensões dos diâmetros de seus poros pequenos e grandes, não proporcionaram uma filtração eficiente. Apesar da presença de poros grandes na caixeta, a madeira se mostrou a mais eficiente na redução dos parâmetros, cor aparente e turbidez.

O sentido de filtração perpendicular às fibras na madeira pinus se mostrou eficiente na redução dos parâmetros de qualidade da água, porém, foi requerida uma alta pressão de trabalho, devido a reduzida quantidade e diâmetro dos poros.

Foi estabelecida a faixa de filtração dos poros das madeiras, que estão pouco acima da microfiltração (entre 0,01 e 0,0001 mm). Nesta faixa de filtração é possível remover sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos a partir da coagulação da água.

A pressão de filtração utilizada nos ensaios das madeiras garapuvu e pinus (sentido paralelo) condiz com o sugerido em literaturas no que diz respeito aos valores usualmente utilizados em tratamento de água por membranas de microfiltração, entre 3 e 15 m.c.a (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Os valores da resistência imposta na filtração obtidos nos ensaios estiveram acima dos usuais utilizados em membranas de microfiltração para o tratamento de água (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Deve-se levar em conta a distinção entre o cerne e o alburno no momento de



seccionar as membranas do tronco das madeiras, já que, o alburno é mais permeável que o cerne.

Vale ressaltar o caráter experimental desse trabalho, que pelo pioneirismo do uso de membrana de madeira, não há uma tecnologia desenvolvida especificamente para esse caso, sendo necessário assimilar características pertinentes de outras tecnologias semelhantes para o desenvolvimento do tema.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J.F. **Pós-tratamento de Efluentes Sanitários Através de Membranas**; Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

BRANDÃO, A.T.O. Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba/ SP, 1989.

BRASIL. Ministério da saúde. Portaria nº. 2.914, 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, Disponível em: <  
[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis./gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis./gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>, acesso em 04/12/2013.

BUSTNES, T.E., MACKLEY, M. R. **The capture and release of biomass using a high voidage fibrous filter**. Chemical Engineering Science vol. 60, 2005.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras. Recomendações Silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília:EMBRAPA-CNPQ,1994.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. **Resolução Conama nº 357**. Disponível em: <  
[www.mma.conama.gov.br/conama](http://www.mma.conama.gov.br/conama)>, acesso em 21/10/2012.

CORRÊA, E. **Filtração de água em membranas de madeira**; Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2002.

DI BERNARDO, BRANDÃO e HELLER. **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas**; FINEP, 1999.

DI BERNARDO, L. e DANTAS D.A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**; Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, v.1, São Carlos/SP, 1993.

DI BERNARDO, L. e DANTAS D.A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**; v.2, São Carlos/SP, 2005.

HAMAN, D.Z.; SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. Gainesville: University of Florida.

HESELEIN, R.C. **Características da madeira Pinus Elliotti Engelm aos 30 anos de idade**, 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**, 2<sup>a</sup>ed, Campinas/SP, 2008.

MELO JÚNIOR, F. J. C. **Anatomia de madeiras históricas: um olhar biológico sobre o patrimônio cultural**; Joinville/ SC, 2012.

MIERZWA, J. C.; DA SILVA, M. C.; RODRIGUES, L.; HESPAHOL, I. **Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n.1, 2008.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira eucalipto para a construção civil**; Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo/ SP, 1997.

RAVEN, H. P, EVERT. F. R, EICHHORN. E. S. **Biologia Vegetal**; Nova York/ NY, Estados Unidos, 1996.

RIBEIRO, M.L. e DE LUCA, S.J. **Tratamento de águas por filtração por membranas**, Instituto de Pesquisas Hidráulicas; UFRGS, 2001.

RICHTER, C. A., AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Tratamento de água: Tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda., 1991.

ROWELL, R. M.; **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, 1st ed., CRC Press: Madison, 2005.

SCHNEIDER, R. P; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 2001.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. New York: Springer Wood Science, 1984.

SILVA, M. R. **Medição de permeabilidade do eucalipto brasileiro**; São Carlos/ SP, n.3, 2010.

University of Kentucky Cooperative Extension Service, **An Introduction to Wood Anatomy Characteristics Common To Softwoods & Hardwoods**, 1997.

VIEIRA, M.F. **Aplicação de um processo de complexação/ultrafiltração para remoção de poluentes do branqueamento TCF (Totally Chlorine Free)**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá/ PR, 1999.

VON SPERLING; M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos – Vol.1**. Belo Horizonte, 3ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 2005.

## **7    ANEXOS**

### **Anexo 1: Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura**

Figura 19: Madeira caixeta em aproximação 22x.

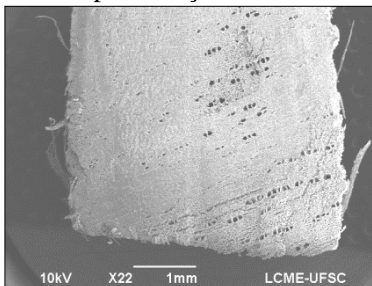


Figura 21: Madeira caixeta em aproximação 50x.

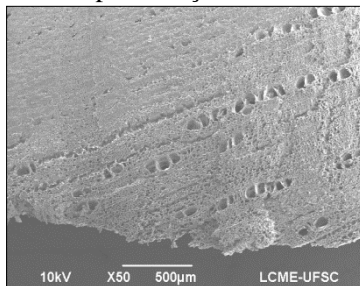


Figura 20: Madeira caixeta em aproximação 250x.

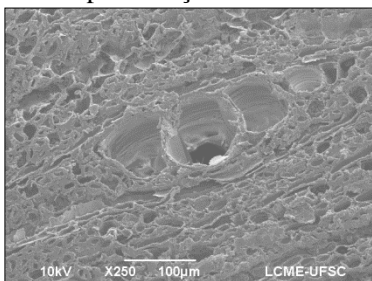


Figura 22: Madeira caixeta em aproximação 500x.

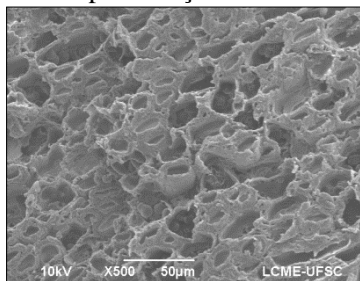


Figura 23: Madeira garapuvu em aproximação 22x.

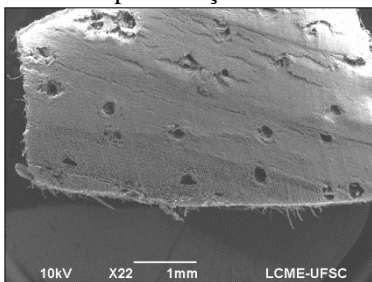


Figura 24: Madeira garapuvu em aproximação 50x.

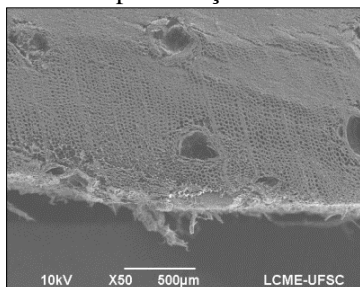


Figura 25: Madeira garapuvu em aproximação 50x.

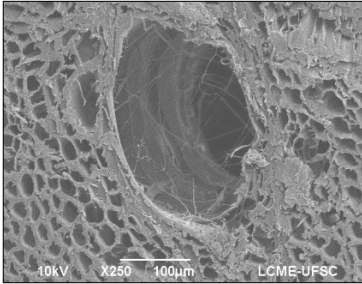


Figura 28: Madeira garapuvu em aproximação 500x.

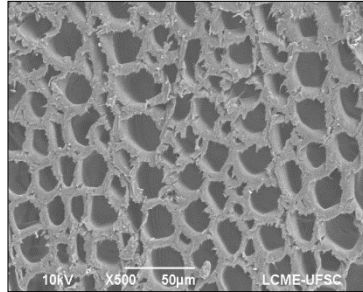


Figura 26: Madeira pinus em aproximação 22x.

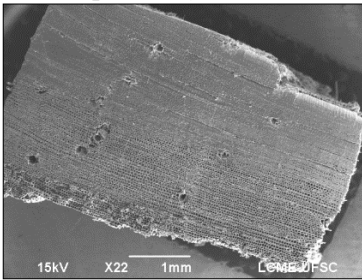


Figura 29: Madeira pinus em aproximação 50x.

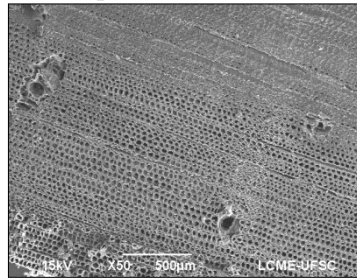


Figura 27: Madeira pinus em aproximação 250x.

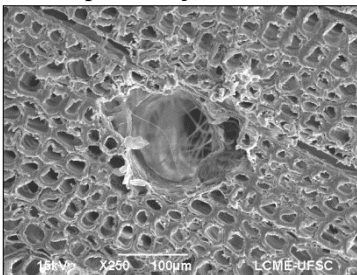


Figura 30: Madeira pinus em aproximação 500x.

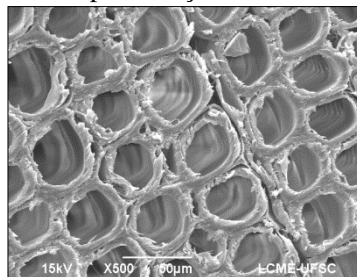


Figura 31: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 22x.

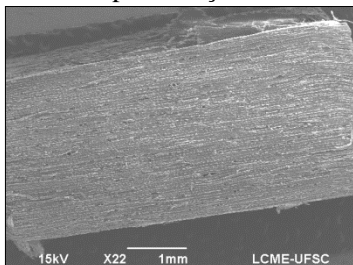


Figura 33: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 50x.

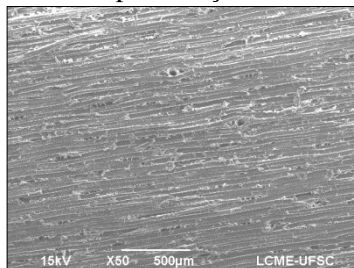


Figura 32: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 250x.

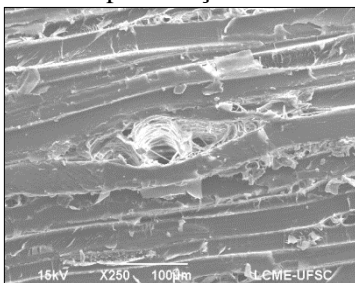


Figura 34: Madeira pinus, no sentido perpendicular as fibras, em aproximação 1.000x.

